

微型车缓冲块静态特性有限元分析

潘宇¹,何云峰²,何志兵³,杨平辉²

(1. 广西科技大学鹿山学院, 广西 柳州 545616; 2. 上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州 545007; 3. 襄阳汽车轴承股份有限公司, 湖北 襄阳 441022)

摘要: 利用 Abaqus/Standard 有限元软件建立微型车缓冲块的有限元模型, 根据硬度和缓冲块在上极限的压缩量, 反求其支反力, 判别缓冲块是否满足悬架匹配要求, 并通过试验数据验证该有限元模型的有效性。结果表明, 计算机仿真结果与试验结果基本吻合, 证明本方法有效可行。

关键词: 微型车; 缓冲块; 有限元分析; 强度分析; 刚度曲线; Abaqus 软件

中图分类号: TQ336.4⁺2; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2015)07-0418-04

随着汽车工业的飞速发展^[1], 人们对舒适性与 NVH[噪声(Noise)、振动(Vibration)、声振粗糙度(Harshness)]的要求越来越高。为了改善车辆动力学性能, 隔离路面不平引起的振动噪声, 在悬架系统各构件的连接部位往往大量采用橡胶衬套, 因此研究橡胶元件的力学性能对改善汽车舒适性和 NVH 性能具有重要意义。本研究结合有限元软件 Abaqus/Standard 对微型车缓冲块的力学性能进行分析。

1 橡胶材料的超弹性本构模型及其选择

与普通金属材料不同, 橡胶材料同时具有几何非线性和材料非线性, 这种双重非线性导致橡胶材料受力后的变形是一个非常复杂的过程, 同时具有大位移、大应变, 本构关系也非常复杂^[2]。此外, 橡胶材料的另一个突出特点是体积不可压缩性。又因其力学行为对工作温度、加载过程等十分敏感, 使得描述橡胶的行为更加复杂。目前较成熟的橡胶本构模型有基于连续介质力学理论的多项式形式模型, 可以用应变能密度函数来表示。它有两类表示方法: 其中一类以应变不变量(变形张量的 3 个不变量 I_1, I_2 和 I_3) 表示的应变能密度函数, 即 $W=W(I_1, I_2, I_3)$; 另一类以主伸

长率(3 个主伸长比 λ_1, λ_2 和 λ_3) 表示的应变能密度函数, 即 $W=W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 。变形张量的 3 个不变量和 3 个主伸长比的关系为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中的主伸长比为 $\lambda_i = (L_0 + \Delta L)/L, i=1, 2, 3$, 其中 L_0 为橡胶试样初始长度, ΔL 为长度变化量, λ 的下标 1, 2 和 3 分别代表 X, Y 和 Z 轴方向。假设橡胶材料为各向同性和不可压缩材料, 则 $I_3=1, W=W(I_1, I_2, I_3)$ 简化为 $W=W(I_1, I_2)$ 。

1.1 Mooney-Rivlin 模型和 Neo-Hookean 模型

假定橡胶在变形过程中各向同性和体积具有不可压缩性, 构建橡胶材料的本构模型, 用应变能密度函数表示^[1]。应变能密度可以分解为应变偏量能和体积应变能, 其函数模型为

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (2)$$

式中, 参数 N 为选择的多项式阶数。 d_k 的值决定材料是否压缩, 如果 d_k 为零, 则表示材料完全不可压缩。对于橡胶, 泊松比接近 0.5, 可以视为不可压缩, J 是橡胶变形后与变形前的体积比。对于上述多项式模型, 无论 N 取何值, 初始剪切模量 G_0 和初始体积模量 k_0 均取决于多项式的一阶 ($N=1$), 即

作者简介: 潘宇(1984—), 男, 河南郑州人, 广西科技大学鹿山学院讲师, 硕士, 主要从事机械 CAD/CAE 及底盘动力学的研究。

$$\left. \begin{aligned} G_0 &= 2(C_{10} + C_{01}) \\ k_0 &= 2/d_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

多项式模型的特殊形式可以由设定参数为零得到。如果设多项式(2)中 $C_{ij}=0 (j \neq 0)$, 则得到减缩的多项式模型:

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} (J - 1)^{2i} \quad (4)$$

式中, $N=1$; 多数橡胶材料可看成体积不可压缩, 因此 $J=1$, 则得到不可压缩橡胶材料的 Neo-Hookean 模型:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (5)$$

该模型较为简单, 仅需一项材料常数, 在小应变范围内与试验结果吻合很好。

对于多项式(2), $N=1$, 则只有线性部分的应变能保留下来; 多数橡胶材料是不可压缩的, $J=1$, 因此可得到不可压缩橡胶材料的 Mooney-Rivlin 模型:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (6)$$

式中, C_{10} 和 C_{01} 可以通过单轴拉伸试验得到, 该模型几乎可以模拟所有橡胶材料的力学行为, 适用于中小变形, 计算精度较高。

1.2 Yeoh 模型

对于减缩的多项式模型, 多项式(4)中如果 $N=3$, 则得到其特殊形式; 橡胶材料是不可压缩的, $J=1$, 因此得到 Yeoh 模型:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (7)$$

Yeoh 模型比较适合模拟炭黑填充橡胶的大变形行为, 可以用简单的单轴拉伸试验数据来预测其他变形的力学行为。

Mooney-Rivlin 模型和 Neo-Hookean 模型是橡胶材料常用的本构模型, 是最简单的超弹性模型, 不能表示应力-应变曲线急剧突变的行为, 两者的计算精度相当。Mooney-Rivlin 模型几乎可以模拟所有橡胶材料的力学行为, 能较好地模拟中小变形的超弹性材料特性。

2 橡胶材料特性

对橡胶特性的研究一般是做好样件, 采用材料试验机测得橡胶材料特性曲线, 需耗费相当的物力和财力才能得到满足设计要求的橡胶材料特

性。有限元仿真技术的发展为橡胶材料特性研究提供了另一种方法。汽车工业使用的橡胶衬套在实际工作过程中变形都不是很大^[3], 因此在小变形下可以把应力-应变关系近似看成是线性的, 与金属材料一样, 可以近似用弹性模量 $E=3G$ 、泊松比 $\mu \approx 0.5$ 来表示材料特性。在橡胶工业中, 常采用 Mooney-Rivlin 经验公式, 以橡胶材料硬度表示橡胶弹性, 橡胶硬度 (H_A) 用邵尔 A 型硬度计测出, 通过经验公式得到橡胶的剪切模量 (G , MPa)、弹性模量 (E , MPa) 和两个常数 C_{10} , C_{01} ^[4-5]。

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{0.755 \ 4H_A + 5.53}{100 - H_A} \\ E &= 3G \\ C_{10} &= \frac{E}{6 \times 1.25} \\ C_{01} &= 0.25C_{10} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3 缓冲块有限元分析

缓冲块是通过硫化技术将缓冲块衬垫与缓冲胶硫化在一起的零件, 通过 U 型螺栓和定位凸块固定在桥壳上^[6], 因此将两者分别附上材料属性, 缓冲块衬垫附上普通钢材的弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ Pa, $\mu=0.3$; 缓冲胶选择超弹性材料 Mooney-Rivlin 模型, 通过硬度计测出橡胶硬度为 65 度, 根据式(8), 得 $E=4.43$, $C_{10}=0.59$, $C_{01}=0.15$, 由于橡胶部分形状较复杂, 为提高计算精度, 将网格大小控制在 1~2 mm, 在 Abaqus 中用 Tetra4 一阶四面体单元分别对缓冲块衬垫和缓冲胶进行网格划分。

完全固定缓冲块衬垫与桥壳配合的面, 用刚性面替代车架下表面, 通过刚体运动将刚性面耦合到外部耦合点上, 使刚性面与外部耦合点成为一个刚性连接体, 由于缓冲块衬垫与缓冲胶硫化在一起, 因此用 Tie 将相互接触的表面耦合在一起。

为便于收敛, 在外部耦合点 RP-1 上施加强迫位移, 位移等于缓冲块在上极限的压缩变形 30 mm。

根据有限元分析结果可以求得刚体参考点的位移和反力^[7], 并以位移为横坐标、力为纵坐标建

立坐标系,即可获得缓冲块的刚度曲线(见图1虚线),同时还可获得缓冲块压缩至1/2时的最大应力(见图2),应力值对缓冲块的耐久性能起着至关重要的直接作用。

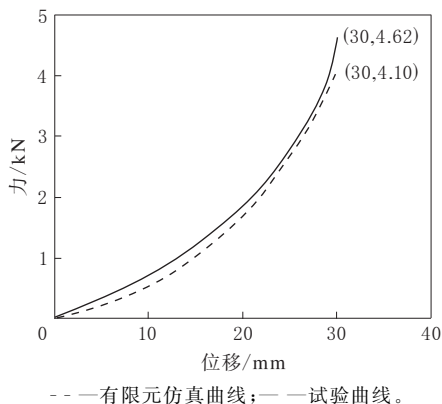


图1 有限元仿真和试验缓冲块刚度曲线对比

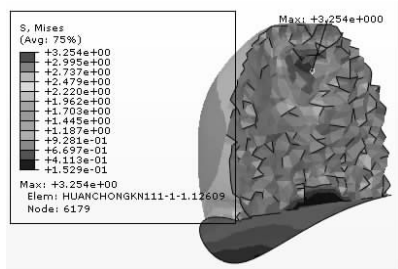


图2 缓冲块压缩至1/2时的最大应力

4 缓冲块的轴向压缩试验

用材料试验机对缓冲块进行压缩试验^[8],在垂直方向以 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度加载 30 mm,通过力和位移传感器获得缓冲块压缩变形与反力的关系,得出缓冲块在垂直方向的静刚度曲线(见图1实线)。

对比图1两条曲线可以看出,有限元分析结果与试验结果基本接近,缓冲块产品图的技术条件要求压缩变形后的载荷正负偏差不能超过700

N,图1对比结果证明了所选本构模型和本构参数合理,该试验较好地验证了有限元分析结果。

从图1还可以看出,仿真结果比试验值略偏小,这主要是由于缓冲块成型工艺比较复杂,成型过程中温度、压力、时间等的变化对缓冲块材料性能有较大影响;其次有限元模型是经过简化的,载荷与实际约束不可能与试验完全一致。

5 结论

橡胶件变形不是特别大时,用 Abaqus 仿真软件采用 Mooney-Rivlin 模型对缓冲块进行有限元分析可行,仿真结果与试验结果基本吻合。采用该方法有利于提高产品设计水平,缩短开发周期,降低开发成本。通过有限元方法可以找出零件最大应力点,有针对性地改进设计模型,从而提高橡胶零件耐久性能。

参考文献:

- [1] 石少亮,吴伟蔚,黄虎,等. 车用橡胶衬套的非线性有限元分析[J]. 机械设计与制造,2011,9(9):30-32.
- [2] 杨晓翔. 非线性橡胶材料的有限元单元法[M]. 北京:石油工业出版社,1999:4.
- [3] 范让林,郭志军,黄元毅. 车用隔振橡胶有限元分析的若干理论问题考虑[J]. 拖拉机与农用运输车,2010,27(2):1-4.
- [4] 王伟,邓涛,赵树高. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品,2004,25(4):60-63.
- [5] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业,2008,55(8):467-470.
- [6] 王见. 聚氨酯减振缓冲块静态特性有限元分析及对比试验[J]. 科协论坛,2009(3):91-92.
- [7] 何小静. 橡胶隔振器静态特性计算与建模方法的研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [8] 蒋永峰. 扭杆式半独立悬架性能分析与优化[D]. 长春:吉林大学,2012.

收稿日期:2015-01-01

Finite Element Analysis on Static Characteristics of Mini-vehicle Bump Stop

PAN Yu¹, HE Yun-feng², HE Zhi-bing³, YANG Ping-hui²

(1. Lushan College of Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545616, China; 2. SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd, Liuzhou 545007, China; 3. Xiangyang Automobile Bearing Co., Ltd, Xiangyang 441022, China)

Abstract: The finite element model of mini-vehicle bump stop was established by using Abaqus/

Standard software. Based on the hardness and the compression in the upper limit, the force was acquired and whether the bump stop design met the suspension matching requirements was evaluated. The effectiveness of the finite element model was verified by experimental test result. The results showed that the computer simulation results were in good accordance with the experimental test results, indicating that the method was effective.

Key words: mini-vehicle; bump stop; finite element analysis; strength analysis; stiffness curve; Abaqus software

环保型再生橡胶自律标准发布

中图分类号: TQ335; X783.3 文献标志码: D

2015 年 4 月 3 日, 由中国橡胶工业协会牵头制定的《E 系轮胎再生橡胶》(环保型再生橡胶) 自律标准正式发布。为加速淘汰煤焦油, 推进再生橡胶行业的绿色发展, 多环芳烃、重金属、多溴联苯醚的含量限值被首次列入再生橡胶相关标准。该标准于 2015 年 6 月 1 日起正式实施。

“这次制定标准时, 大家摒弃了以往强调物理性能指标的思路, 改以化学指标为重, 就是为了能以标准的形式推进再生橡胶行业的绿色化进程。”中国橡胶工业协会废橡胶综合利用分会秘书长曹庆鑫表示。

曹庆鑫说: “以前再生橡胶的标准更多强调的是强力等指标。由于观念与理念进入误区, 70% 以上的再生橡胶产品在‘高强力’、‘复原橡胶’概念的误导下, 使用了污染环境、污染产品的矿物焦油系列软化剂等原材料, 使再生橡胶中多环芳烃含量严重超限, 这种再生橡胶被广泛使用在橡胶制品中, 造成对环境的严重污染, 同时也很难生产符合 REACH 法规多环芳烃指标限量要求的再生橡胶产品。因标准导向加重的生产二次污染问题、职业健康问题以及应用这些产品的制品多环芳烃超标问题, 均应该从标准入手纠偏, 从而使再生橡胶产品满足制造过程环保、产品使用无害化的要求, 并与欧盟 REACH 法规和 RoHS 指令规定的多环芳烃、重金属限量要求同步, 满足国内外橡胶企业的需求。”

为促进再生橡胶产品实现绿色转型, 《E 系轮胎再生橡胶》标准参照国家关于大气环境的法律法规和技术性标准及欧盟 REACH 法规、RoHS 指令, 将多环芳烃和有毒有害物质指标放在了技

术指标的首位, 并规定多环芳烃和有毒有害物质中多环芳烃限量指标要达到欧盟标准限量值的要求。根据国内现有环保助剂在环保再生橡胶生产过程中的具体使用情况和反应机理, 对物理性能及工艺加工性能技术指标进行了可行性修订, 将化学分析指标、物理性能指标分成 3 个等级。

“使用煤焦油的再生橡胶也容易老化, 使用寿命基本只有 5 年, 而使用皂角等植物系列软化剂的再生橡胶产品 10 年后弹性依旧很好。”曹庆鑫说, “为了能让轮胎等下游企业有更好的使用效果, 标准特别对橡胶烃、炭黑等的含量进行了规定。同时参照 GB/T 13460—2008《再生橡胶》中的 7 项参数, 对技术要求及检测方法进行了修订采用, 并对其中密度和门尼粘度试样制备提出了统一要求。”

(摘自《中国化工报》, 2015-04-07)

涂敷辊的修磨工艺

中图分类号: TQ336.4+1; TQ330.6+9 文献标志码: D

由攀枝花钢城集团铁路设备修造有限公司申请的专利(公开号 CN 103551938A, 公开日期 2014-02-05)“涂敷辊的修磨工艺”, 涉及的涂敷辊修磨工艺包括粗磨、中磨和精磨。粗磨采用砂轮磨床进行磨削, 去除涂敷辊表面存在的划痕、凹陷和脱层缺陷; 中磨和精磨采用车床和砂带组合的方式进行磨削, 涂敷辊表面粗糙度达到使用要求后密封包装入库。该发明在原有工艺的基础上取消了车床车削缺陷层的步骤, 简化了工序, 但涂敷辊表面粗糙度满足要求; 同时减少了胶层的浪费, 延长了辊体的使用寿命, 降低了维修成本, 提高了生产效率。

(本刊编辑部 赵 敏)